



Рисунок 2 - График экспериментальных расходных характеристик вихревого кондиционера.

#### Список литературы

1. А.П. Меркулов Вихревой эффект и его применение. Самара, 1997.
2. Н.В. Савченко Локальное обеспечение оптимальных температурных условий. Сборник трудов VI международного конгресса «Экология и здоровье человека», Самара, 1999 г.

## НЕКОТОРЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ КОНСТРУКЦИЙ ГТД, НОВЫХ ТХНОЛОГИЙ, КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИЛОВ И ПРОБЛЕМЫ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ

Петухов А.Н.

Центральный институт авиационного моторостроения , г. Москва

Опыт развития современных ГТД показывает, что их создание связано с непрерывным повышением параметров рабочих процессов, повышением напряжённости основных деталей, совершенствованием технологических процессов их изготовления, созданием новых конструкционных материалов при неизменном повышении надёжности и ресурса двигателей. Анализ конструкций ГТД отечественных и западных фирм позволяет выделить некоторые тенденции конструктивных решений, технологических и прочностных проблем, возникающих перед разработчиками. Зачастую они требуют нестандартных решений.

На этапе проектирования обязательно закладываются следующие принципы:

- модульности конструкции;
- ремонтпригодности узлов и отдельных деталей не только в стационарных условиях, но и во время промежуточного технического обслуживания;

- применения развитой системы диагностики по различным параметрам (обнаружение дефекта на ранней стадии возникновения, слежение за его развитием - программа ENSIP- на всех стадиях эксплуатации и ремонта двигателей., учёт выработки ресурса по различным критериям и т.п.).

Эти тенденции хорошо просматриваются на основных элементах роторов компрессоров и турбин зарубежных двигателей.

*Модули вентилятора и компрессора.* Для компрессоров современных ГТД характерно:

- увеличение напорности ступеней;
- переход к широкохордным лопаткам;
- повышенная динамическая напряжённость, связанная с сокращением числа ступеней и деталей;
- облегчение и повышение жесткости роторов за счёт применения электроннолучевой сварки вместо болтовых или штифтовых соединений;
- применения конструкций типа «блиск» и «блинк».

Последние два пункта подразумевают внедрение принципов проектирования с учётом допустимых повреждений.

В вентиляторах ГТД повышенной размерности, стоимость которых достигает 15% общей стоимости двигателя, проблема лопаток имеет несколько аспектов:

- защита от повреждаемости лопаток посторонними предметами, попадающими на вход в двигатель;
- большая масса лопатки, которую, с одной стороны, невозможно удерживать внутри вентилятора при её обрыве, а, с другой - является источником малоциклового усталости как самой лопатки в корневом сечении, так и диска (в ободной части, полотне и в ступице);
- наличие антивибрационных полок примерно на 0,5% снижает газодинамическое совершенство ступени и является потенциальным источником разрушений либо самих полок, либо лопаток, либо даже диска;
- большие центробежные нагрузки от лопатки на ротор, которые особенно высоки после обрыва лопатки;
- необходимость отстройки лопаток от автоколебаний, флаттера и т. п.

Одним из эффективных способов решения проблемы снижения повреждаемости лопаток вентилятора является специальное профилирование входного кока таким образом, чтобы до входа в лопаточный венц воздушного потока он способствовал сепарации попадающих на вход двигателя посторонних предметов. Отсепарированные посторонние предметы (твёрдые частицы) направляются непосредственно в наружный контур или через специальный регулируемый перепуск. Другой способ связан непосредственно с конструкцией лопатки - за счёт увеличения у неё радиусов входной и выходной кромок.

Как показали исследования [1], максимальное снижение предела выносливости наблюдается, когда глубина повреждения приближается к величине радиуса кромки лопатки, при этом для титановых сплавов величина коэффициента концентрации становится равным  $K_\sigma \approx 4,0$ , т.е. предел выносливости повреждённой лопатки снижается примерно в четыре раза. При наличии начальной трещины в зоне повреждения предел выносливости составляет около 40 МПа, а величина  $K_\sigma$  достигает 8,0. При испытаниях на повреждаемость двигателя посторонними предметами требуется обеспечить его работоспособность по крайней мере в течение 100 ч после повреждения при минимальном коэффициенте концентрации напряжений, равном 3, в рабочих и направляющих лопатках компрессора [2].

Проблемы удержания разрушенной лопатки решается созданием защитного пояса на корпусе вентилятора (стальном или из кевлавра), который должен локализовать разрушение от удара, эквивалентного разрушению 2,5 лопаток вентилятора [2]. Реальная эффективность защитного пояса проверяется экспериментально. Для снижения центробежных нагрузок от рабочей лопатки сплошная металлическая лопатка вентилятора заменяется облегчённой лопаткой: полый металлической (фирмы RR, PW,) или лопаткой, изготовленной из КМ- композитного материала (фирма GE). Полая конструкция позволяет снизить массу лопаток примерно на 50 %, лопатка из КМ на - 60 %. Масса лопатки вентилятора из КМ высотой 1000 мм и хордой 600 мм на двигателе GE90 составляет 14 кг. В настоящее время фирма GE объявила международный конкурс на создание полый металлической лопатки.

Лопатки вентилятора должны:

- быть высоко технологичными при изготовлении;
- быть экономически эффективными (одна лопатка из КМ обходится фирме GE для двигателя GE90 в 30 000 \$);
- хорошо сопротивляться повреждениям, возникающим при попадании в воздушный тракт посторонних предметов, включая крупных птиц;
- допускать ремонт не только в заводских, но и в полевых условиях;
- быть отстроены от опасных форм и видов колебаний.

Специальные испытания и опыт эксплуатации лопаток обоих вариантов лопаток вентилятора (широкохордных полых металлических и из КМ) на зарубежных двигателях показали, что они обладают повышенной стойкостью к повреждаемости, хотя для композитных лопаток потребовалась дополнительная защита кромок металлической пластиной от повреждений кромок. Кроме того, для внедрения таких лопаток были освоены специальные технологии, в частности, для металлических лопаток сверхпластическое деформирование, диффузионная сварка и т. п. Фирма RR, более 25 лет применяет на двигателях RB211, Tay и V2500 полые широкохордные лопатки из титанового сплава, разработав для этого автоматизированную технологию изготовления и перейдя от полых лопаток с сотовым наполнителем к трёхслойным лопаткам.



Для лопаток из композитных материалов потребовались разработка и создание специальных намоточных и пропиточных станков. Кроме технологических сложностей, связанных с созданием специального оборудования для изготовления лопатки из КМ, требуется внедрение неразрушающих методов контроля качества диффузионной сварки и т.д.

В высоконапорных вентиляторах многорежимных ГТД, где наблюдается ярко выраженная тенденция создания широкохордных лопаток, несмотря на существенно меньший выигрыш в массе, имеются сведения о применении [2] полых лопаток вентилятора в «блиске», однако технология изготовления диска в этом случае принципиально отличается от традиционной о чём будет сказано ниже.

Применение широкохордных лопаток в компрессорах сопровождается сокращением числа ступеней и деталей, но при этом повышается напорность и газодинамическая напряжённость ступеней. Поэтому главными задачами в случае применения широкохордных ступеней являются борьба с различного вида колебаниями лопаток и за повышение их живучести после повреждения в эксплуатации. Первое достигается совершенствованием трёхмерного метода газодинамического проектирования, второе, как и в случае крупногабаритных лопаток, - увеличением радиусов входных и выходных кромок или их разгрузкой.

В последнее время в двигателях средней и малой размерности получают распространение компрессорные колёса типа «блиск». Они встречаются, как в вентиляторе, в подпорных ступенях вентилятора, так и в компрессоре высокого давления, где также имеются широкохордные лопатки. Как одиночные ступени впервые они применялись в осевых компрессорах малоразмерных двигателей типа Т700, хотя прообразом их можно считать ступени центробежных компрессоров. Реализация таких конструкций стала возможной при появлении нового поколения металло-режущих станков (например, 5-и координатных фрезерных станков с ЧПУ фирмы «Лихти»), позволяющие выполнять обработку по сложной расчётной пространственной траектории с заданной точностью (до 0,15 мм). Несколько сложнее обстоит дело с механизацией отделочных операций (шлифовкой и полировкой). Фирма GE для этого применяет два метода обработки: электрохимическую и высокоточную механическую без последующей отделочной ручной операции.

Колёса типа «блиск» с широкохордными лопатками позволяют уменьшить число деталей и получить жёсткий ротор с минимальным весом. Однако при этом возникает ряд проблем, связанных:

- с отстройкой лопаток от различных видов колебаний;
- с повышением сопротивляемости лопаток повреждениям;
- с проблемой ремонта лопаток и т.п.

Отдельно стоит вопрос получения оптимальной структуры в заготовке, из которой изготавливается колесо. Как известно, основным конструкционным материалом в компрессоре является титановый сплав.

Для обеспечения максимальной несущей способности диска из титанового сплава, где основные нагрузки вызываются центробежными силами, требуется игольчатая структура металла, обеспечивающая максимальные механические свойства и термическую стабильность при статическом и циклическом нагружении. В то же время для обеспечения несущей способности профильной части лопатки, испытывающей значительные знакопеременные вибрационные нагрузки, необходимо получить максимальное сопротивление усталости, которое достигается при наличии корзинчатой структуры сплава. Формирование таких существенно разнородных структур возможно в узких интервалах температур и степеней деформации. Если при штамповке обычного диска в различных его зонах (ступице, полотне, ободе) очень сложно обеспечить однородные структуру и свойства, то в «блиске» совместить получение заданных лопаточных и дисковых структур чрезвычайно сложно. Поэтому здесь необходимо принимать компромиссные решения, по-видимому, за счёт снижения сопротивления усталости лопаток. Более того, ротор, состоящий из «блисков», которые соединены между собой электроннолучевой сваркой, требует заключительной термообработки, вследствие чего будет дополнительное снижение сопротивления усталости лопаток. Сложность конфигурации «блиска» для повышения сопротивления усталости лопаток требует применения нестандартных методов для их упрочнения.

Меньше проблем с точки зрения обеспечения конструкционной прочности «блисков» обстоит, если они изготавливаются из сталей или никелевых сплавов, у которых основные характеристики прочности, в отличие от титановых сплавов, формируются в процессе термической обработки.

Фирма GE применила [2] конструкцию «блиск» для вентилятора в двигателе F120 (GE37) в сочетании с полыми лопатками, которые соединяются с диском сваркой трения. В то же время при создании вентилятора для двигателя F100-PW-229A фирма PW отказалась от применения конструкции «блиск» вентилятора [3].

Кроме «блисков», для снижения массы роторов компрессоров применяются неразъёмные соединения дисков, не имеющих ярко выраженных полотна и ступицы. Для повышения несущей способности такого ротора промежуточные кольца между дисками упрочняются (обматываются по наружному диаметру) волокнами из КМ (угле- или стекловолокнами и др.). Сформированная таким образом конструкция носит название «блинк».

В компрессорах применяются следующие конструкционные материалы:



- титановые сплавы для лопаток и дисков - сплав 64, IMI 834 (для последних ступеней).;

- сплав Inco 718 (для НА и лопаток последних ступеней); Waspalloy, R88D, MERL 76 (порошковый) для дисков.

**Модуль турбины.** Характерной конструктивной особенностью для турбин высокого давления является применение бесполочных охлаждаемых лопаток, отливаемых по выплавляемым моделям с заданной кристаллической ориентацией (монокристаллитные или с направленной кристаллизацией). Лопатки как правило имеют сложную внутреннюю систему охлаждения в сочетании с конвективно-плёночным и теплозащитным покрытием (ТЗП). Применяются лопатки с системой охлаждения ламеллой из сплава CMSX-4 моно (двигатель GMA-301X фирма Аллисон). Для лопаток 1-ступени ТВД применяются чаще сплавы PWA1480, CMSX4; NS, AM1; для соплового аппарата - PWA647, PWA1480; PWA1447 как с монокристаллической, направленной кристаллизацией, так и с равноосной структурой; для лопаток ТНД - RR3000, PWA1422; R142 с направленной кристаллизацией.

В турбинах применяются демпферы, снижающие уровень вибрационных напряжений, торцы лопаток имеют износостойкие наплавки.. Лопатки СА ТВД могут быть монокристаллическими, с интенсивным плёночным охлаждением и ТЗП, лопатки СА ТНД - с направленной кристаллизацией .

Обращают на себя конструкции дисков, которые в наиболее нагруженных зонах, как правило, не имеют концентраторов напряжений: лабиринтные уплотнения и дефлекторы, формирующие систему охлаждения, выделяются в отдельные детали, отверстия для болтовых соединений выносятся в наименее напряжённую зону диска и т. д. Избегают применения сложных болтовых пакетов, хиртовских соединений и т. п. Диски часто изготавливаются из порошковых материалов методом газостатического прессования, позволяющим получать заготовки довольно сложной конфигурации. Для дисков применяют двойную термообработку и формируют переменную структуру: крупнозернистую в ободной части (для повышения сопротивления длительной прочности и ползучести) и мелкозернистую в полоте для повышения сопротивления усталости. В качестве материалов для дисков применяются: MERL76, Udimet20, MAR M002, Waspalloy

**Эксплуатационная надёжность.** В конструкцию современных двигателей закладываются широкие возможности проведения быстрого и эффективного контроля состояния элементов в полёте и на земле с помощью вибродатчиков, счётчиков циклов, радиографической и вихретоковой дефектоскопии, магнитных пробок и т. п. Часть сигналов с датчиков записываются для последующего анализа, а другие выводятся на дисплей в пилотскую кабину. В корпусе двигателя предусматриваются лючки (12 и

более) для осмотра деталей по всему газовоздушному тракту. Вводя бороскоп в любое из отверстий, получают цветные изображения той или другой детали (узла) двигателя, а совмещая изображения с трёхмерным чертежом или эталоном, делают вывод о допустимости повреждения. Полученная информация запоминается на носителе. Допускается без съёма с крыла двигателя и без перебалансировки замена до 30% лопаток вентилятора. Во время технического обслуживания могут заменяться лопатки компрессора и сопловые лопатки.

Стремление снизить эксплуатационные расходы на 1ч наработки выдвинуло новую концепцию проектирования, которая гарантирует достижение высокого уровня эксплуатационной технологичности даже за счёт основных данных двигателя. На этапе проектирования анализируется стоимость жизненного цикла двигателя, согласуются с эксплуатационными службами чертежи общего вида, приспособления, инструмент, а в случае разногласий предпочтение отдаётся мнению служб эксплуатации.

На сколько остро ставится сейчас проблема расходов на техническое обслуживание можно судить по тому факту, что Консорциум Эрбас отдал предпочтение двигателю PW6000 по сравнению с двигателями CFM56 и BR715 по следующим причинам:

- двигатель PW6000 имеет на 40% меньше вращающихся деталей (около 2000 единиц);
- расходы на его техническое обслуживание на 30% меньше.

На этапе доводки стремятся выявить как можно больше недостатков. Это требует своевременного анализа большого числа параметров в процессе испытаний. Для примера, во время испытаний двигателя YF120 в испытательном комплексе ASTF НИЦ им. Арнольда (США) в течение 37 ч было зарегистрировано 875 000 параметров.

Тем не менее интересно познакомиться некоторой статистикой об авариях и катастрофах, имевших место при доводке некоторых новых двигателей и на зарубежных авиалиниях за последние годы. Несомненно наибольшую опасность представляют разрушения дисков вентиляторов и компрессоров, лопаток вентиляторов, т. к. локализовать последствия таких разрушений не всегда удаётся.

В настоящее время ФАУ установило более жёсткие требования к проведению осмотров, находящихся в эксплуатации авиадвигателей на пассажирских самолётах различных зарубежных авиакомпаний из-за опасности возникновения нелокализованных отказов (см.табл.). Требования ФАУ обязывают фирмы-изготовителей не только проводить контроль опасных мест в детали несколькими неразрушающими методами, но и сохранять документацию о выполненной работе.

Таблица - Сведения о критических деталях, разрушение которых не локализуется, на различных типах двигателей и самолётах, где они установлены

Тип двигателя, модификация	Тип самолёта	Критическая деталь	Число двигателей
JT8D-1, -1A, -1B, -7, -7A, -7B, -9, -9A, -11, -15, -15A, -17, -17A, -17R, -17RA	B.727, B737, DC-9	Диски 1-й и 2-й ступеней компрессора	11 300
CF6-6, -45, -50, -80A, -80C2, -80E1	A.300; A.310; A.330 B.747; B.767; DC-10 MD-11	Диск 1-й ст. вентилятора; диски 1-й и 2-й ст. ТВД	5400
JT9D 19 модификаций	DC-10; A.300; A.310; B.747; B.767	Втулки вентилятора	2 700
CFMI CFM56-2, -2A, -2B -3, -3B, -3C	DC-8; D.737; Боинг E-3; E-6; KC-135	Диски вентиляторов и ТВД	4 700
JT8D-209; -217; -217A; 217C; 219	MD-80	Диск 1-й ст. компрессора	2 600
IAE V2500-A1; -A5; -D5	A.300; A.310; A.321 MD-90	Диски вентиляторов	830
GE90-76B; -77B; -85B; -90B; -92B	Боинг B.777	Диски с3...5 ст. компрессора, лабиринт ТВД	100

Сами по себе данные таблицы свидетельствуют, с одной стороны, о большой потенциальной опасности, которой подвергаются несколько миллионов пассажиров, а, с другой - можно представить в какую сумму обойдётся фирмам-изготовителям предупреждение катастроф и устранение дефектов.

Из представленных данных можно судить о степени выявления опасных дефектов в критических деталях, длительности его устранения, эффективности вводимых мероприятий. Эти дефекты носят как конструктивный характер (связные колебания лопатки и диска, флаттер, недостаточная прочность осевых фиксаторов и т.п.), так и технологический типа (альфированное включение в титановых дисках, низкое качество механической обработки и т. п.). Переход дефекта из модификацию в модификацию, повторяемость на различных типах самолётов, лишний раз свидетельствует о его конструктивно-технологическом характере и о «вялой» работе разработчика над его устранением. Особенно трудно контролировать сварные роторы компрессоров. Такие разрушения были вызваны дефектами в дисках компрессора на двигателе типа CF6 б и др., включая военные (GE F404-400).



Достаточно опасны разрушения лопаток вентилятора: разрушения надполочных частей лопатки из-за флаттера на двигателе CF6-6 с трагическим исходом; разрушение полых лопатки на RB.211-524, -535. Периодичность осмотров на RB.211-524-х была установлена через 80 циклов, а на -535-м через 300 циклов, при этом в последнем случае было снято 67 лопаток, у которых были обнаружены трещины в пере лопатки и расслоение металла в хвостовике. Аналогичные дефекты наблюдаются на «Тренте-700» и на -800. Разрушения лопаток вентилятора с тяжёлыми последствиями имели место на F101-GE-100; GE F110-129; F404/RM.12 (модификация F404-GE-400).

Имеют место растрескивание гребешков лабиринтов сварных дисков компрессоров с переходом их в усталостные трещины и разрушение. Имели место явления флаттера в лопатках вентилятора и компрессора (дв. V2500; F404 / RM; F119-PW и др.). Довольно часто встречаются усталостные разрушения хвостовиков лопаток компрессоров даже на лопатках с антивибрационными полками. Имеют место усталостные разрушения лопаток турбины высокого давления, возбудителями колебаний которых являются лопатки соплового аппарата и т. д. Кроме того, прочность монокристаллических лопаток существенно зависит от ориентации кристалла в плоскости поперечного сечения лопатки по отношению к её ориентации.[6] Поэтому при неблагоприятной ориентации осей монокристалла к осям лопатки в плоскости её поперечного сечения разрушение лопатки может произойти при меньших числах циклов или напряжений, чем при оптимальной.

Таким образом, можно отметить значительный прогресс в конструкторских решениях и их тесную связь с развитием современных расчётных методов, в совершенствовании технологических процессов изготовления не только отдельных деталей, но и узлов. Продвинулись и стали более эффективными методы диагностики. Всё это позволило значительно повысить рабочие параметры двигателей различного класса. Вместе с тем, анализ дефектов показывает, что проблемы разрушений пока ещё остаются прежними.

#### Список литературы

1. Петухов А.Н. Соппротивление усталости деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1993, 240 с.
2. Иностранные авиационные двигатели (по данным иностранной печати). XII издание Под ред. Л.И. Соркина М.: ЦИАМ 1992г. 290 с.
3. Экспресс-информация. По материалам иностранной печати. Серия: Авиационное двигателестроение. №11, март 1999 г., М.: ЦИАМ, 8 с.
4. Экспресс-информация. По материалам иностранной печати. Серия: Авиационное двигателестроение. №7, февраль 1999 г., М.: ЦИАМ, 10с.
5. Экспресс-информация. По материалам иностранной печати. Серия: Авиационное двигателестроение. №17, апрель 1999 г., М.: ЦИАМ, 8 с.
6. Колесников В.И., Придорожный Р.П. К ресурсному проектированию монокристаллических охлаждаемых лопаток. В сб.: Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования. Труды международной научно-технической конференции. Харьков, 29 сентября-2 октября 1997 г. г. Харьков, ИПМ им. А.Н. Подгорного НАН Украины, 1997, с. 522-525.